

貯水位の低下によるダムの排砂法

Exclusion of Deposited Sediments in Reservoir
by the Water Level Drop at the Downstream End

田中祐一朗*

呂福祿**

by Yuichiro TANAKA and LU fulu

The method of excluding the deposited sediment by dropping water level and increasing the tractive force in dam-reservoir was discussed. But, when this method is applying into the diffusive theory of river-bed variation, it is not clear that which boundary condition must be used for different width of excluding gate and river.

This study is concentrated on finding such a suitable boundary condition, experimentally and theoretically. The comparison between the theoretical curve and the experimental data shows fairly good agreement.

keywords: exclusion of deposited sediment,
diffusive theory of river bed variation,
boundary condition.

1、はしがき

ダムの堆砂は、ダム上流部での河床上昇、ダム下流部での河床低下、ダム貯水池の機能損失、海岸部での波による侵食など河川環境に様々な問題を生じている。したがって、ダムの排砂問題は河川工学上の重要問題であり、従来から多くの研究がなされている¹⁾。最も効果的な方法は貯水位を低下させることにより、貯水池内の掃流力を増加させることにより排除を行う方法であることが知られている。中国の黄河に築造された三门峡ダムでは排砂門を増設して、洪水時にこれを開けることにより、堆砂対策に成功したことは有名である。しかし、ダムの全幅にわたってゲートを設置することは困難であり、その一部に設置した場合には、縮流による堰上げが生ずる。本研究はこのような場合の排砂効果について、若干の検討を行なったものである。

2、拡散型河床変動理論

芦田²⁾は図-1示すような座標系において、一次元不等流の運動方程式、連続式、及びManningの抵抗則を用いることにより、次のような河床変動に関する拡散型の微分方程式を導いた。

$$\frac{\partial z}{\partial t} - k \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11岐阜市柳戸1番1)

** 岐阜大学研究生 工学研究科土木工学専攻 (同上)

拡散係数 k は、流砂量式として芦田・道上式³⁾を用いると次のようである。

$$k = \frac{17.8}{1-\lambda} \frac{q}{(\sigma/\rho-1)} \frac{A_1^3}{A} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \quad (2)$$

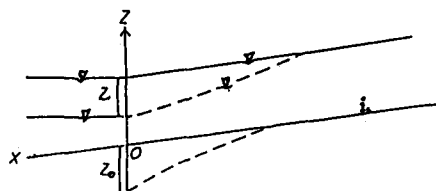
ここに $v/u_* = A$ $A_1 = \frac{A}{6.0 + 5.75 \log_{10} \left\{ \frac{R}{d(1+2\tau_*)} \right\}}$ (3)

R は径深、 d は砂の平均粒径、 τ_* は無次元掃流力である。

$k = \text{const}$ と仮定し、ダム地点($x=0$)での河床低下量 Z_0 を境界条件に与えると、(1)式の解は次のようになる。

$$z = z_0 \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\tau_1} e^{-\tau^2} d\tau \right) \quad (4)$$

ここに $\tau_1 = \frac{-x}{2\sqrt{K_1 t}}$ (5)



である。この解の妥当性は実験によってすでに検証されている。

図-1. 記号説明図

3. ダムの排砂実験

3. 1 実験方法

実験は幅40cm、深さ40cm、長さ15mの鋼製循環水路を用いて行なった。図-2に示すように、開口部の幅 b と高さ a とを変化させ、表-1のような5種類の実験を行なった。初期条件として、全ての実験ケースにおいて、下流端砂厚10cmで上流側へ $1/400$ の勾配に堆砂を敷き均した。流量は電磁流量計を用い、水位はポイントゲージを用い、 $x=1.0 \sim 10.0$ m区間を1.0m毎に測定した。河床形状は超音波式測定器を用いて、ダムから上流側に $x=0.0 \sim 1.0$ mまでは0.1m間隔で測定し、 $x=1.0 \sim 12.0$ m区間を0.2m間隔で測定した。流出土砂量は、河床変動量から求めることが出来るが、布袋製のサンドフィルターで回収測定した流出土砂量と比較した。

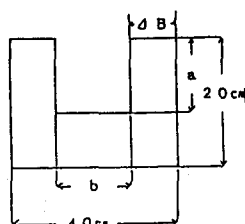


表1. 実験の種類

	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5
b	25	25	25	15	15
a	12	15	18	15	18

図-2. 堰開口部の断面

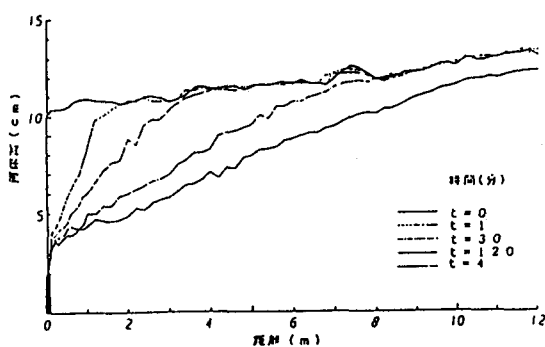


図-3. 河床形状の時間的变化 (No. 3)

3. 2 実験結果

実験の結果による河床縦断の時間的変化を、図-3に示す。No. 3の実験は B/b が1.6の場合であり、横断方向の縮流効果が小さい実験である。図に見られるように、ダム近傍の河床低下はほぼダムのクレスト近くまでに及んでいる。これと比較するために行なった実験が、図-4に示す実験No. 5である。この場合 $B/b=2.67$ であって、ダム近傍で顕著な縮流が形成されている。このため縮流の開始する地点において、河床低下をコントロールする点が現れ、河床低下はこれ以上進行しないことが図から理解されよう。

境界条件として、ダムのクレストと初期河床高との差を Z_0 とした、拡散型河床変動理論と、実験結果を比較したものが図5、6である。実験No. 3は縮流の効果が小さいため、理論と実験との一致は比較的良好。これに対し、縮流の影響が大きいNo. 5の実験の場合、理論と実験の適合度が極端に悪くなる。このような場合、もはや境界条件としてダムのクレスト高を用いることはできない。実験結果にみられたように、河床低下をコントロールする河床高を知り、この点での境界条件を用いる必要があることを上の二つの図は意味しているものと思われる。

4. 境界条件設定法

4. 1 理論的考察

スリット部の横断面形状、水路の縦断形状及び基準面を図7示すように定める。水路幅 B 、スリット幅 b 、スリット頂部高 H_d とし、水路上流で河床低下の及ばない等流断面を(A断面)、ダム上流部で流水が縮流し始める断面を(u断面)、スリット断面を(S断面)とする。水深や流速などの水理量は慣用の記号を用いるものとし、添え字 a, u, s 、でそれぞれの断面での量であることを示す。

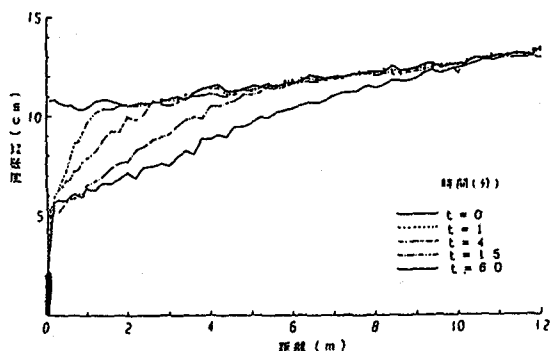


図-4. 河床形状の時間的変化 (No. 5)

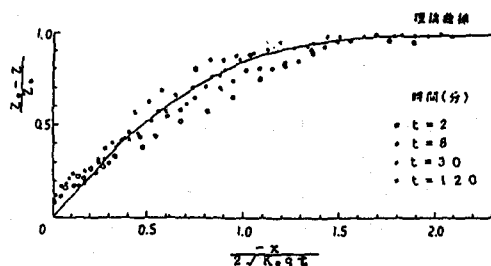


図-5. 拡散型河床変動理論による河床低下の変化特性 (No. 3)

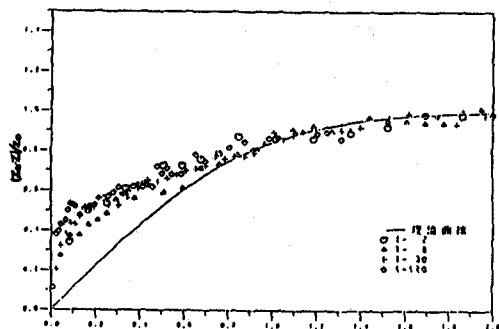


図-6. 拡散型河床変動理論による河床低下の変化特性 (No. 5)



A、S、U、断面において水流の連続条件を考えると、

ここに、 Q : 流量、 h : 水深、 V : 平均流速である。

(A断面) と (U断面) の間では

(U断面)と(S断面)の間では

である、ここに、F各断面間における底面せん断力の合力、W各断面間における水の重力、I各断面間の河床勾配、他は慣用の水理量である。ただし、Fは水路床に作用するせん断力の合力で、 $F = \rho g h B I$ である。ここで水深hとしては、A断面とU断面での平均値を使用すると、 $h = (h_a + h_u)/2$,

また、エネルギー勾配を $I_{\text{su}} = (E_{\text{s}} - E_{\text{u}})/L^*$ で与えると、

となる。ただし、 Z は基準面からの河床高である。また A と U 間のエネルギー差は、Manning式を用いると、

$$E_s - E_u = n^2 L' V_u^2 / h_u^{4/3} \quad (11)$$

となる。同様にU断面とS断面では、

$$F_{uus} = \frac{\rho g}{4} (B+b) * (h_u + h_s) (E_u - E_s) \quad (12)$$

$$W_{uus} = \frac{\rho g}{4} (B+b) (h_u + h_s) (Z_u - H_d) \quad (13)$$

$$E_u - E_s = n^2 L' V_u^2 / h_u^{4/3} \quad (14)$$

である。

4. 2 剝離領域の長さ

以上の諸式では未知量の数と方程式の数とが一致せず、連立方程式系としては不完全である。そこでU断面とS断面間の距離、すなわち縮流による剝離領域の長さ L' を求める方法について考える必要がある。この問題に関しては、

すでに石原・四方⁴⁾によって検討されている。彼らは図. 8 に示すような、縮流部の接近流の方向を意味する、

$$\theta_0 = \tan^{-1} (\Delta B / L') \quad (15)$$

が重要な指標となると考えた。水路幅縮小比 $\beta_* = b/B$ が増加するにつれて、 $\Delta B / L'$ が減少することが推測される。そこで多くの実験結果から θ_0 と β_* の間に

$$\theta_0 = M (1 - \beta_*) \quad (16)$$

という直線的な関係が成立することを見出した。

$$\text{ここで } M = 5 (R_{sm} / 10^4)^2 \quad (17)$$

であり、 R_{sm} とは $R_{su} = V_u h_u / \nu$ 、 $R_{ss} = V_s h_s / \nu$ で定義される2断面でのReynold数の平均値である。

4. 3 結果

以上のようにすると、未知数の数と方程式の数は一致し、連立方程式系は完結するので、これを解くことによりU断面での水深 h_u 及び河床高 z_u を求めることが可能となる。図. 9 は、以上のようにして計算された河床高 z_u と実験での実測値との比較を示したものであり、両者はほぼ一致していることを見なす事ができる。

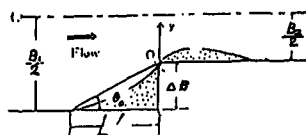


図-8. 剝離領域の模式図

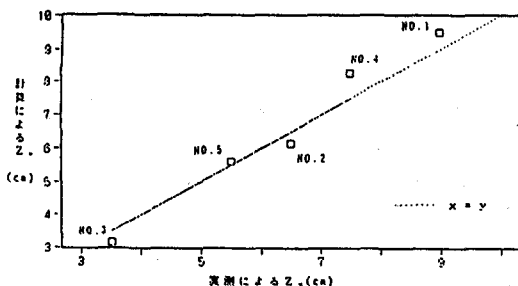


図-9. 実測値 z_u と計算 z_u の比較

この Z_u を用いると、縮流を伴う場合の拡散型河床変動理論の境界条件は、

$$Z_o' = Z_d - Z_u \quad (18)$$

となる。この新しい境界条件を用いて、実験No.5を再計算した結果を示したものが図10である。先の図5に比べ、理論と実験との適度は格段に向上していることが認められる。図11はこうした各時間毎河床変動図から計算した流出土砂量と、実験により採取された排出土砂量とを比較したものである。時間の経過と共に2次関数的に排出土砂量は増加しており、また計算と実測との適合度も極めて良好である。

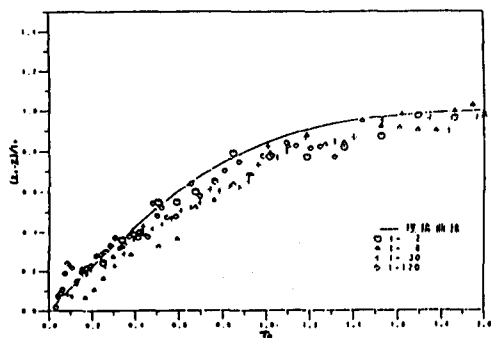


図-10. 下流端河床低下量を Z_o' として与えた場合の河床低下の変化特性 (No. 5)

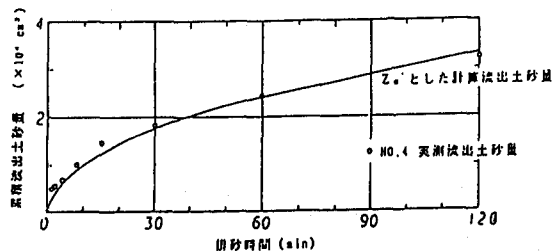


図-11. 排出土砂量の計算値と実測値の比較

5. むすび

以上のように、本研究はダムの開口幅の過小により、堰上げ効果が顕著に現れる場合にも、一次元拡散型河床変動理論の適用する可能性について検討した。このような縮流を伴う場合、縮流開始点付近に、河床底下をコントロールする点 Z_u が存在することを実験により明らかにした。若干の理論的検討の結果、この不動点 Z_u を算出する方法を提案した。この Z_u を用いることにより、河川幅とスリット幅が異なる場合における、拡散型河床変動理論を適用する新しい境界条件を明らかにした。その結果、各種のスリット幅におけるダム排砂の効果と、その河床変動を予測することが可能となる。研究の遂行に際し、川越佳人氏（熊谷組）、渡辺和浩氏（昭和板金）らの協力を得た。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 芦田和男、河川の土砂災害とその対策、森北出版、pp. 221-222、(1983)、
- 2) 芦田和男、河床変動に関する研究—河流端水位低下による河床変動、京大防災研年報12-B、pp. 431-447、(1969)、
- 3) 芦田和男・道上正規、移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第206号、pp. 59-69、(1972)、
- 4) 石原藤次郎・志方俊之：開水路急縮部の水理学的性状に関する研究、土木学会論文集、第138号、pp. 30-38、(1967)